

Poglavlje 5

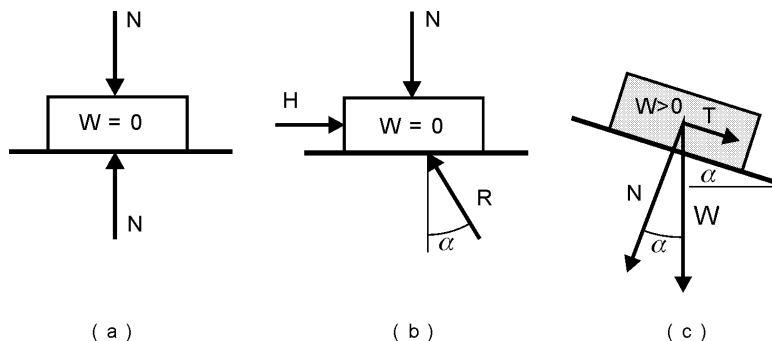
SMIČUĆA ČVRSTOĆA TLA

5.1 UVOD

U ovom poglavlju prikazaće se jedna od najvažnijih inženjerskih osobina tla. Prikazane su standardne metode ispitivanja i opisana konvencionalna linearna teorija smičuće čvrstoće.

Smičuća čvrstoća predstavlja najveći smičući napon koji se može naneti strukturi tla u određenom pravcu. Ranije je rečeno da naponi svestranog pritiska zbijaju tlo, uz povećanje krutosti tla sa povećavanjem nivoa normalnih napona. Sa druge strane, smičući naponi povećavaju distorzijske deformacije do granične, maksimalne veličine napona, koja predstavlja smičuću čvrstoću tla. Kada je dostignut najveći moguć smičući napon, praćen plastičnim deformacijama, kaže se da je došlo do loma, pri čemu je mobilisana sva smičuća čvrstoća tla. Tada smičući naponi imaju tendenciju da pomere deo mase u odnosu na ostalu masu tla ukoliko je lom lokalizovan samo u ravni smicanja tj. gde se pojavljuje **klizna površ**.

Najveći deo smičuće čvrstoće potiče od otpora trenja po kontaktima između zrna. Da nema trenja tlo bi se ponašalo kao teška tečnost. Smičuća čvrstoća na nekoj ravni zavisi od efektivnih normalnih napona koji na nju deluju.



Slika 5.1. Model trenja, blok na horizontalnoj i kosoj ravni

Sasvim pojednostavljen model trenja je prikazan na Slici 5.1. Blok bez težine na horizontalnoj podlozi, opterećen vertikalnom silom N , u ravnoteži je sa jednakim reaktivnim opterećenjem koje deluje na kontaktu bloka i podloge (Slika 5.1-a). U slučaju da se u prisustvu vertikalne sile N blok dodatno opterećuje horizontalnom silom H , pravac reaktivne sile R odstupa od normale za ugao α (Slika 5.1-b). Ukoliko se horizontalna sila povećava postepeno do veličine pri kojoj dolazi do relativnog pomeranja između bloka i podloge, jer je savladano trenje na kontaktu, i rezultanta R u odnosu na normalu zaklapa ugao ϕ koji predstavlja ugao trenja. Slično, ako se blok težine W podvrgne postepenoj rotaciji podloge tako da ona postaje kosa ravan, u trenutku kada nagib podloge α u odnosu na horizontalu dostigne veličinu ugla trenja ϕ , nastaće klizanje bloka niz ravan. Normalna sila N na na kontaktu je tada $W \cos \phi$, sila smicanja T je $W \sin \phi$, a njihov odnos je $T/N = \tan \alpha = \tan \phi$. U fizici se govori o koeficijentu trenja μ za koji se u mehanici tla kaže da je $\mu = \tan \phi$, gde je ϕ ugao smičuće čvrstoće tla.

Stvarna slika mehanizma smičućeg loma tla je složenija od uprošćenog prikaza klizanja bloka po kosoj ravni ili relativnog pomeranja dva kruta tela po hrapavom kontaktu. **Smičuće napone prima samo**

skelet čvrstih čestica. Naponi se prenose preko sila na kontaktima susednih zrna. Pri tome zrna se ne samo taru, već mogu i rotirati, kotrljati se, preskakati jedno preko drugog, pa i drobiti u različitoj meri.

5.2 KULON-MOR-TERZAGIJEV (linearan) ZAKON LOMA

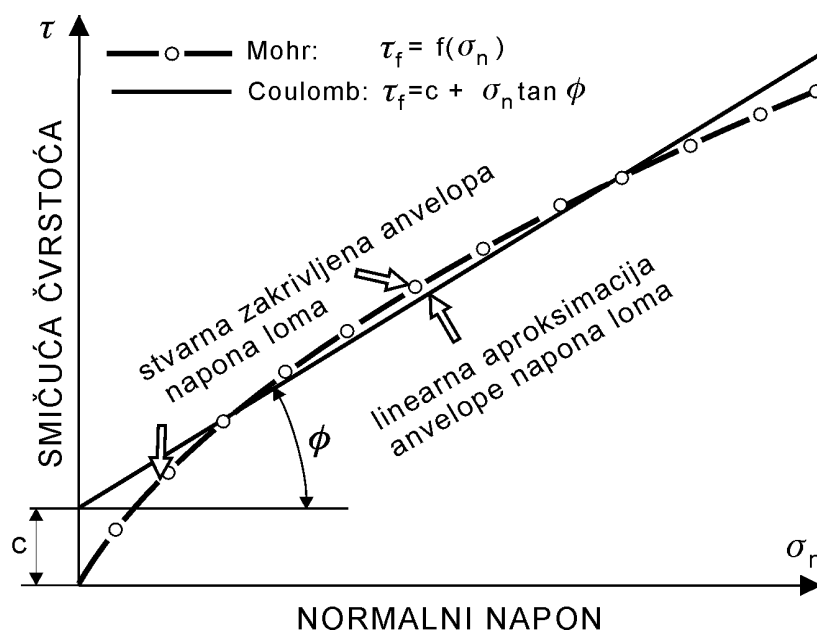
Prvi upotrebljiv zakon loma tla je linearan i nazvan po Kulonu (Coulomb, 1776) koji je prvi simultano naznačio da čvrsti materijali imaju koheziju, a da se na kontaktu dva materijala, pri relativnom smičućem pomeranju, pojavljuje otpor trenja. Takozvani Kulonov zakon definiše smičuću čvrstoću tla empirijskim izrazom u obliku:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi' = c' + \sigma_n' \tan \phi' \quad (5.1)$$

gde se za parametre obično koriste sledeći nazivi:

- c' kohezija za efektivne napone ili prividna kohezija,
- ϕ' ugao smičuće otpornosti (ugao trenja za efektivne napone).

Terzagijev izraz (5.1) ima aproksimativni karakter. Priroda ove aproksimacije, u odnosu na realnost, kvalitativno je prikazana na Slici 5.2. Stvarna anvelopa napona loma, određena ispitivanjima na realnom tlu, prolazi kroz koordinatni početak ($c' = 0$) i manje ili više je, zakrivljena linija konkavna je u odnosu na osu normalnih napona. Prava linija je može biti zadovoljavajuća aproksimacija za izabran interval napona.



Slika 5.2. Zavisnost smičuće čvrstoće od normalnog napona

5.3 MERENJE SMIČUĆE ČVRSTOĆE TLA

Smičuća čvrstoća konkretnog tla i odgovarajući parametri, koji čvrstoću opisuju, mogu se odrediti laboratorijskim ispitivanjima reprezentativnih uzoraka uzetih iz mase tla na terenu ili na posebno pripremljenim uzorcima u laboratorijski kontrolisanim uslovima. Uzimanje uzoraka, transport, skladištenje i rukovanje pre ispitivanja, zahtevaju pažljivo postupanje, posebno ako se radi o

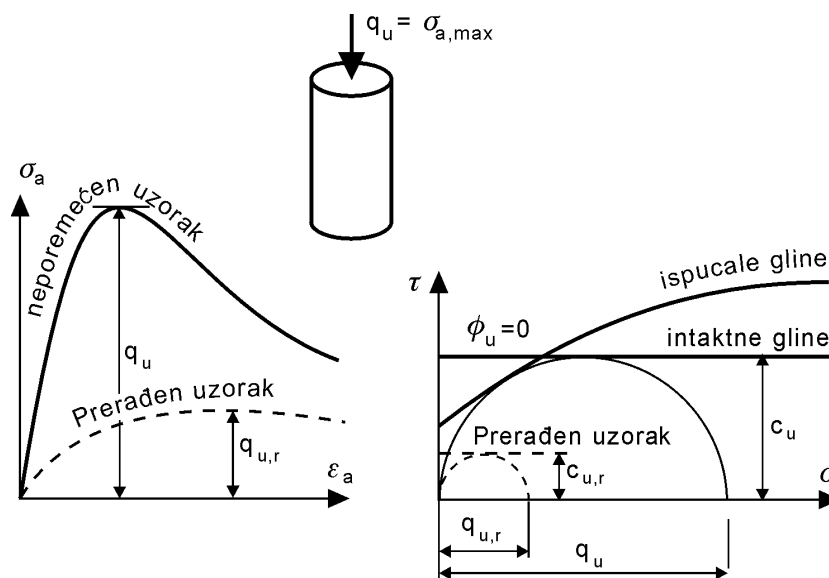
neporemećenim uzorcima, jer treba sačuvati prirodnu strukturu i vlažnost. Neporemećeni uzorci sitnozrnog tla (gline i prašine) mogu se uzeti utiskivanjem cilindra u dno bušotine, ili iz kocke kada se uzorak uzima iz istražne jame ili bunara. Pri tome se smatra da su ručno uzeti uzorci iz kocke manje poremećeni od uzoraka uzetih utisnutim ili pobijenim cilindrom, tako da daju pouzdanije rezultate pri ispitivanjima mehaničkih osobina.

U nevezanim krupnozrnim materijalima (pesak i šljunak) uzimanje neporemećenih uzoraka iz terena je veoma teško izvodljivo, tako da se laboratorijskim postupcima ispituju posebno pripremljeni uzorci peskovitih materijala u prerađenom stanju. Zbog praktične nemogućnosti da se u laboratorijskim uslovima tačno reprodukuje stanje krupnozrnog uzorka tla u terenu, merenje smičuće čvrstoće se vrši indirektno terenskim penetracionim opitima (SPT, CPT).

OPIT JEDNOAKSIJALNE KOMPRESIJE

Opit se najčešće provodi na neporemećenim uzorcima vodom zasićenih sitnozrnih materijala uzetih iz terena. Cilindričan uzorak, (Slika 5.3) sličnih dimenzija kao u opitu triaksijalne kompresije, opterećuje se povećanjem aksijalnog napona $\sigma_i = \sigma_a$ do loma, pri čemu su bočni naponi $\sigma_r = \sigma_2 = \sigma_3 = 0$. Maksimalna vrednost aksijalnog napona predstavlja jednoaksijalnu čvrstoću q_u .

Opit se provodi relativno brzo, sa brzinom aksijalne deformacije većom od 1% visine uzorka u minuti, tako da je opit praktično nedreniran. Pošto je $\phi_u = 0$, smičuća čvrstoća je nedrenirana kohezija c_u . Iz Morovog dijagrama proističe da je nedrenirana kohezija jednaka polovini jednoaksijalne čvrstoće tj. $c_u = q_u/2$.



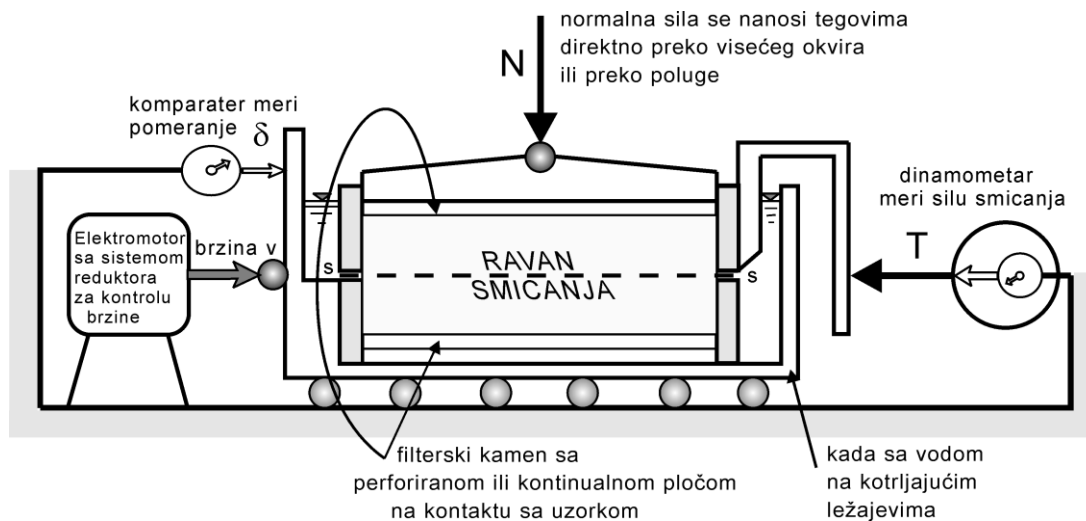
Slika 5.3. Opit jednoaksijalne kompresije

Možda nije suvišno reći da krupnozrna nevezana tla, (pesak, šljunak i kameni nabačaj), nemaju jednoaksijalnu čvrstoću.

OPIT DIREKTNOG SMICANJA

U načelu, u opitu direktnog smicanja uzorci tla se opterećuju normalnim naponom primenom vertikalne sile, a zatim horizontalnom silom, koja izaziva napone smicanja po sredini uzorka. Mere se otpori uzorka prema ovom smicanju.

Aparat se sastoji od metalne kade sa vodom, metalne dvodelne kutije kvadratnog ili kružnog preseka, čije stranice, odnosno prečnik, imaju veličinu 50 do 100 mm, a sastoje se od donjeg okvira pričvršćenog za dno kade, i gornjeg okvira. Između ova dva okvira deluje smičuća sila T u visini sredine uzorka. Normalna sila N se nanosi preko metalnog poklopca. Uzorak se stavlja između dve perforirane metalne ploče i dve porozne keramičke ploče.



Slika 5.4. Presek kutijastog aparata za direktno smicanje uzorka sa kontrolisanim brzinom smičućeg pomeranja

Za kompletan opit direktnog smicanja obično se ispituje 3 pripremljena uzorka sa odgovarajućim veličinama normalnih napona. U načelu, opterećenja se nanose u dve faze:

I faza: Nanosi se normalna sila N koja je konstantna za jedan uzorak tokom celog trajanja opita.

II faza: Povećava se smičuća sila T do loma ili do veličine pomeranja u iznosu od 10%-15% dimenzije uzorka u pravcu smicanja.

Veličine normalnih i smičućih napona (σ_n , τ) izračunavaju se tako što se normalna i smičuća sila podele sa efektivnom površinom smicanja između dva okvira, koja zavisi od relativnog smičućeg pomeranja δ .

Veličine normalnih napona se biraju tako da se dobiju rezultati u području napona koji su od interesa u konkretnom slučaju ili se traži anvelopa napona loma u širem intervalu. U načelu, prvi uzorak se izlaže najmanjem usvojenom pritisku, drugi sa dva do tri puta većim naponom primenjenim na prvom uzorku, a treći sa dva do tri puta većim naponom upotrebljenim na drugom uzorku. Tipično, normalni naponi su 100, 200 i 400 kPa, ali se mogu upotrebiti i 50, 100 i 200 kPa ili i neka treća kombinacija, ukoliko za to postoje odgovarajući razlozi. Ukoliko se posebnim programom drugačije ne propiše, preporučuje se primena normalnih napona od 50, 150 i 450 kPa. Prema načinu ispitivanja u aparatu za

direktno smicanje primenjuju se tri standardna postupka koji se, pre svega, razlikuju po uslovima dreniranja u pojedinim fazama opterećivanja:

1. DRENIRANI ili SPORI opit, (*D* opit). Postupak sa dreniranjem u obe faze opita za određivanje vršne čvrstoće tla za efektivne napone. Ovaj opit se standardno primenjuje u praksi i daje parametre izražene efektivnim naponima.
2. POVRATNI ili REVERZNI, (*R* opit). Drenirani opit smicanja za određivanje rezidualne smičuće čvrstoće za efektivne napone.

U svakom od navedenih vrsta opita se za nekoliko nivoa normalnih napona σ_n uspostavlja zavisnost između smičućeg napona τ i relativnih smičućih pomeranja δ između gornjeg i donjeg dela uzorka, (Slika 5.5-a). Maksimalne veličine napona smicanja se nanose na (σ, τ) dijagram, u načelu prema Slici 5.5-b, tako da one definišu tačke na anvelopi napona loma koja se najčešće rutinski aproksimira odgovarajućom linearnom zavisnošću (Kulonovom pravom) ili nekom drugom pogodnijom funkcijom.

Glavna prednost opita direktnog smicanja je njegova relativna jednostavnost, uz mogućnost određivanja smičuće čvrstoće po datoj ravni. Ima i nedostataka. U opitu nije moguće merenje pornih pritisaka ili promena zapremine. Polje napona je veoma nehomogeno, naročito pre loma, zbog pojave koncentracije napona na krajevima površi smicanja. Rezultati se ne mogu koristiti za određivanje konstitutivnih veza između napona i deformacija. Mogu se odrediti samo prosečni smičući i normalni naponi u ravni loma, dok se veličina srednjeg glavnog napona, koji deluje na ravan upravnu na ravan smicanja, ne meri, te se kompletno naponsko stanje ne može sasvim tačno odrediti.

DRENIRANI ili "D" OPIT DIREKTOG SMICANJA. Faza I "D" opita, koji se izvodi sa ugrađenim filterskim pločama, se sastoji od konsolidacije uzorka normalnim opterećenjem.

Smičuće pomeranje pri lomu nije unapred poznato, tako da se na početku serije ispitivanja pretpostavi, na primer, u veličini od 1 mm , a zatim koriguje na osnovu prethodnih rezultata. Opit nikada nije isuviše spor tako da za dobijanje pouzdanih rezultata treba koristiti minimalne i razložno izabrane brzine smičućih pomeranja.

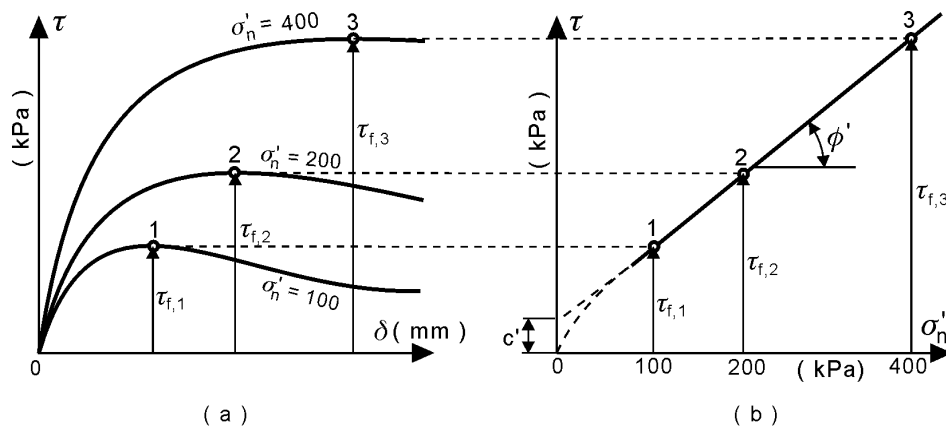
U slučaju glina, trajanje faze II, odnosno faze smicanja, može da iznosi više časova ili čak i više desetina časova, pa i nekoliko dana, dok je kraće kod prašinih materijala, a najkraće kod čistih peskova, jer brzina smicanja zavisi od vodopropusnosti tla. Može se orijentaciono reći da se pesak može smicati brzinom od 1 mm/min , prašina sa oko $0,01 \text{ mm/min}$, a glina sa samo $0,001-0,003 \text{ mm/min}$.

Tipičan rezultat ispitivanja tvrde gline prikazan je na Slici 5.5.

Vršna drenirana smičuća čvrstoća tla pri smicanju za efektivne napone se može aproksimativno opisati linearnom anvelopom napona loma u funkciji normalnog napona u intervalu koji je od praktičnog interesa:

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan \phi'$$

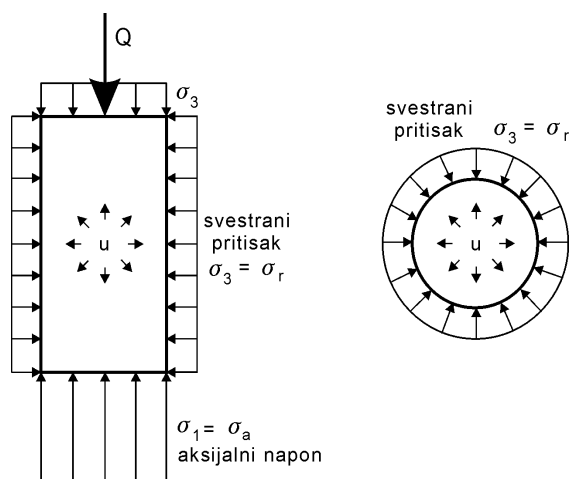
gde stvarna "drenirana" kohezija za efektivne napone različita od nule postoji samo u slučaju cementiranih materijala.



Slika 5.5. Pomeranja i naponi u opitu direktnog smicanja

OPIT TRIAKSIJALNE KOMPRESIJE

Cilindričan uzorak se opterećuje svestranim pritiskom σ_3 , i aksijalnim naponom $\sigma_a = \sigma_1$ do loma, prema Slici 5.6. U standardnim optima je radijalno opterećenje $\sigma_r = \sigma_3$ konstantno, a uzorak se dovodi do loma povećavanjem aksijalnog napona.

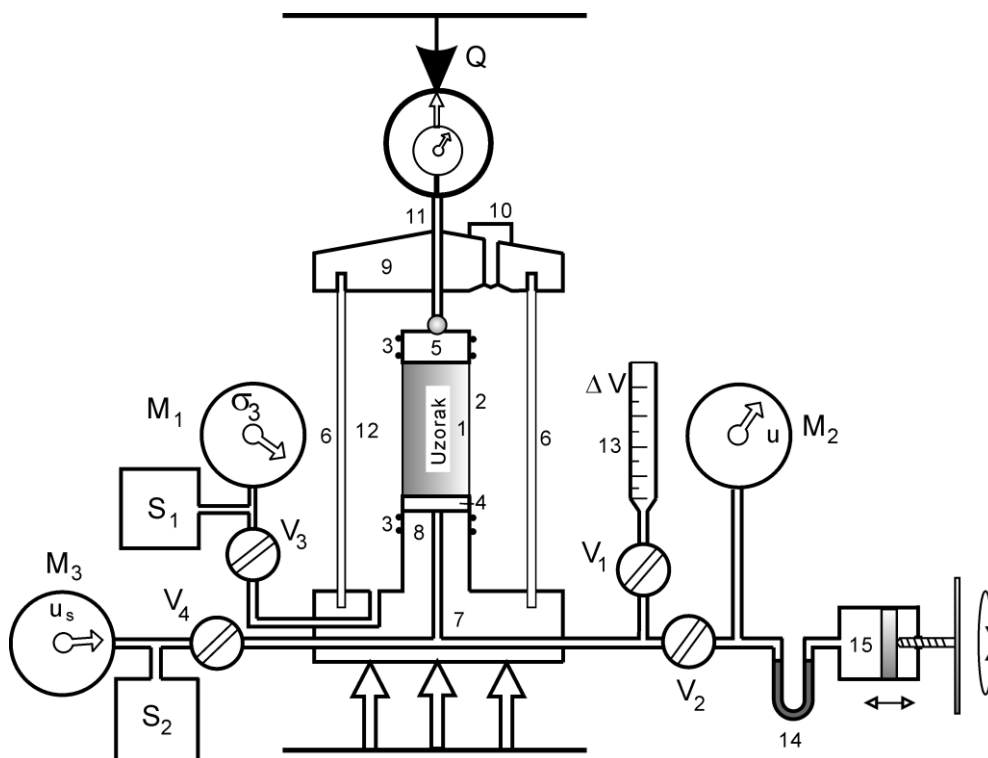


Slika 5.6. Naponi u triaksijalnom opitu

U toku opita se, pod različitim uslovima, registruju naponi i deformacije uzorka i na osnovu dobijenih podataka se izračunava čvrstoća tla pri smicanju. Glavna prednost opita triaksijalne kompresije, u odnosu na opit direktnog smicanja, je u homogenijem polju napona, uz mogućnost merenja pornih pritisaka ili promena zapremine u procesu deformisanja.

Triaksijalni aparat se sastoji od uređaja prikazanih šemom na Slici 5.7. Uzorak (1) je potpuno obmotan tankom gumenom membranom (2), koja se na krajevima pričvršćuje gumenim prstenovima (3) za laku ploču, "kapu", (5) i postolje, pijedestal (8). Između uzorka (1) i pijedestala (8) postavlja se porozna ili masivna pločica (4), zavisno od vrste opita. Pripremljen uzorak se postavlja u ćeliju koja se sastoji od cilindra od pleksiglasa ili drugog pogodnog materijala (6). Cilindar se postavlja na donju masivnu metalnu ploču (7) preko koje se vertikalnim pomeranjem nanosi aksijalna sila. Ploča (7) je dugim (neprikazanim) vijcima vezana za poklopac (9), tako da formira zatvoren prostor ćelije (12). Na poklopcu se nalazi ventil (10) za ispuštanje vazduha iz ćelije kada se ćelija (12) puni vodom pod

pritiskom. Sastavni deo masive ploče (7) je postolja za postavljanje uzorka, pijedestal (8), koji je kanalima u masivnom postolju i cevima povezan sa svim ostalim uređajima, tako da preko porozne ploče (4) omogućava prenošenje pritiska ili protok vode iz uzorka. Postavljanjem gumenih zaptivača između cilindra i poklopca i masivne ploče sa pijedestalom, ćelija se hermetički zatvara.



Slika 5.7. Šema triaksijalnog aparata

Ćelije su najčešće standardno konstruisane za maksimalne unutarnje pritiske do 1000 kPa , pa se uzorak može opteretiti svestranim pritiskom $\sigma_r = \sigma_3 \leq 1000 \text{ kPa}$. Veličina ćelije zavisi od veličine uzorka. Prečnik uzorka se obično kreće u granicama od $35, 38, 50$ do 100 mm . Visina uzorka je dva puta veća od prečnika.

Triaksijalni aparat je najsloženiji aparat u standardnoj geomehničkoj laboratoriji. Aparat zahteva veoma pažljivo, precizno i kvalifikovano rukovanje. Svaki detalj, počev od pripreme i ugrađivanja uzorka, do opterećivanja i merenja tokom ispitivanja, ima znatan uticaj na tačnost i pouzdanost rezultata.

STANDARDNI OPITI TRIAKSIJALNE KOMPRESIJE

Pri standardnim ispitivanjima opterećenje se u načelu nanosi u dve faze

I faza: Nanosi se svestrani pritisak $\sigma_r = \sigma_a = \sigma_3 = \sigma_2 = \sigma_1$. Radijalni pritisak $\sigma_r = \sigma_3$ nakon nanošenja ostaje konstantan za jedan uzorak tokom celog trajanja opita.

II faza: Povećava se aksijalni pritisak $\sigma_a = \sigma_1$ do loma ili do deformacije od oko 20% visine uzorka.

Za kompletan opit se najčešće ispituju najmanje 3 uzorka sa različitim veličinama svestranih pritisaka σ_3 u ćeliji. Veličine svestranih pritisaka za fazu I opita biraju se tako da se dobiju rezultati u području napona koji su od interesa u konkretnom slučaju. U načelu, prvi uzorak se izlaže najmanjim usvojenim naponom, drugi sa najmanje dvostrukom veličinom pritiska primenjenom na prvom uzorku, a treći sa najmanje dvostrukom veličinom pritiska upotrebljenom za drugi uzorak. Tipično, pritisci su *100, 200 i 400 kPa*, ali se mogu upotrebiti i *50, 100 i 200 kPa* ili i neka treća kombinacija, ukoliko za to postoje odgovarajući razlozi. Ukoliko se posebnim programom drugačije ne propiše, preporučuju se pritisci od *50, 150 i 450 kPa*, ili čak *100, 300 i 900 kPa*.

Prema načinu ispitivanja u triaksijalnom aparatu se koriste tri standardna postupka koji se razlikuju po uslovima dreniranja u pojedinim fazama opterećivanja:

1. NEDRENIRANI opit, ("*U*" opit), postupak bez dreniranja u obe faze opita, odnosno "brzi opit". Često se naziva i "*UU*" ili nekonsolidovani nedrenirani opit.
2. KONSOLIDOVANI NEDRENIRANI opit, ("*CU*" opit), postupak sa konsolidacijom u prvoj fazi i bez dreniranja u drugoj,
3. DRENIRANI opit, ("*D*" opit), postupak sa dreniranjem u obe faze opita, odnosno "spori opit". Često se naziva i "*CD*" ili konsolidovani drenirani opit.

Za sve tri vrste opita se najčešće podrazumeva da su uzorci potpuno zasićeni vodom, a ukoliko nisu, ova činjenica se mora posebno naglasiti. U svakom od navedenih vrsta opita meri se promena aksijalnog napona u funkciji aksijalne deformacije uzorka pri konstantnoj veličini radijalnih napona.